

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

Rappel des objectifs du projet

Conclusions relatives aux installations de captage et transport du CO₂

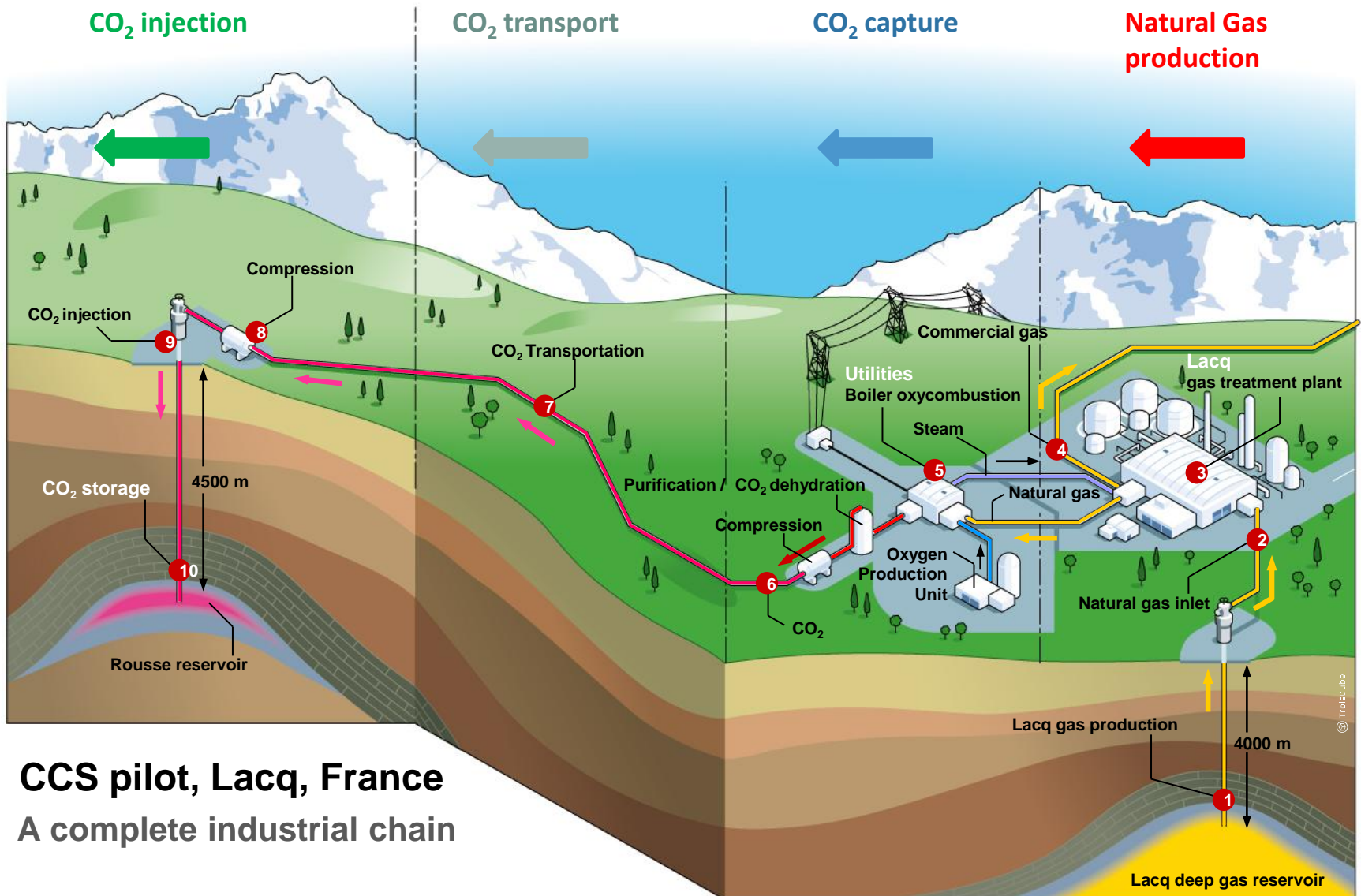
Conclusions relatives au stockage et à l'injection

Conclusions du programme de surveillance

Conclusions générales

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

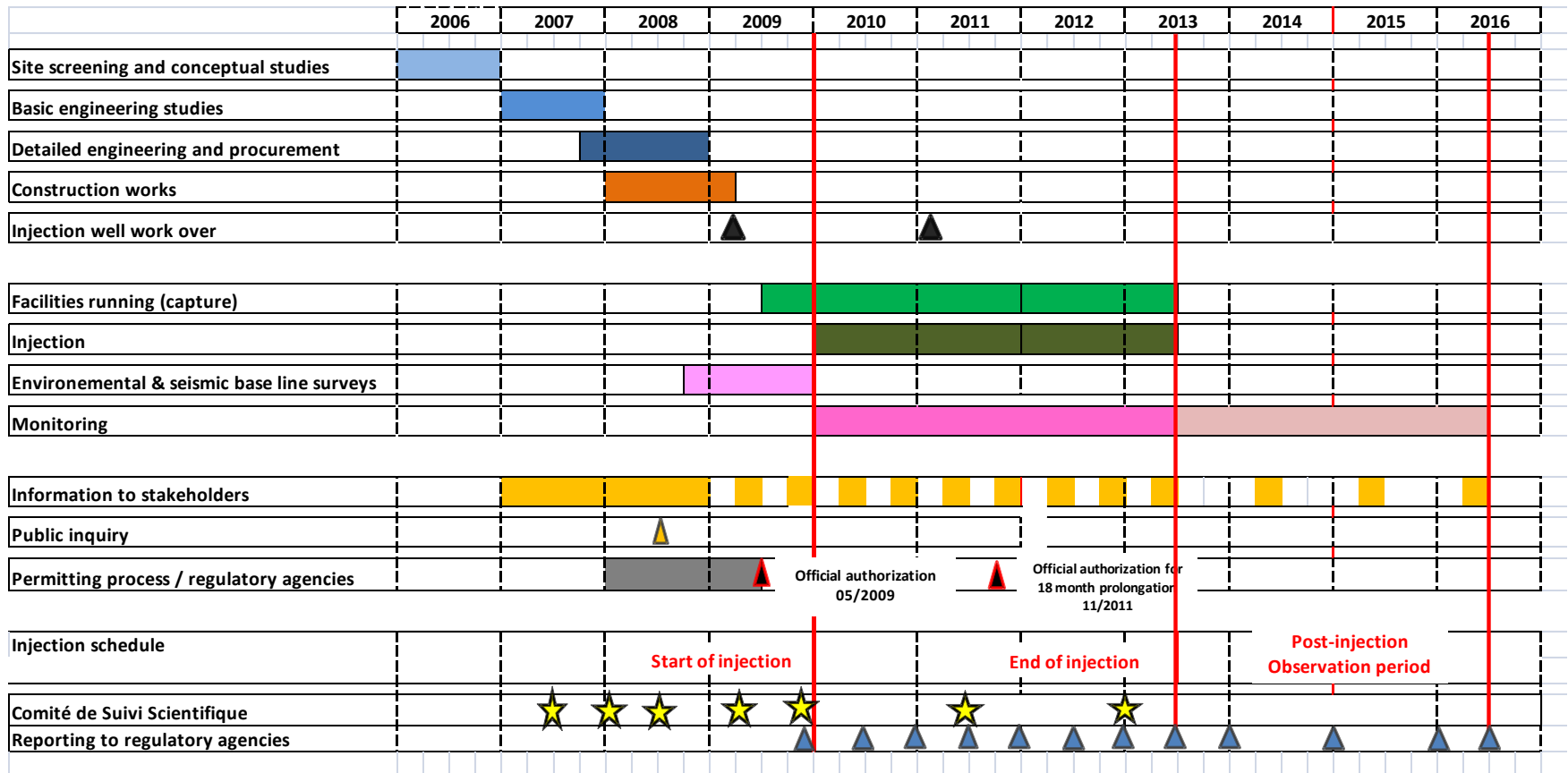
RAPPEL DES OBJECTIFS DU PROJET (J. MONNE)



CCS pilot, Lacq, France
A complete industrial chain

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

RAPPEL DU PLANNING PROJET



SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

RAPPEL DES OBJECTIFS DU PROJET



- **Démontrer la faisabilité industrielle d'une chaîne complète de captage, injection et stockage géologique de CO₂ de combustion pour de la production de vapeur à l'échelle 1/10^{ème} et la possibilité de modifier d'anciennes chaudières à air.**
- **Acquérir une expérience opérationnelle et des données pour développer la technologie d'oxycombustion à l'échelle industrielle avec réduction des coûts (30MWth à 200MWth)**
- **Développer des methodologies de suivi de site de stockage pour préparer les projets industriels futurs, en accord avec les résultats des analyses de risque, les études d'impacts et le retour d'expérience acquis**
- **Mettre en place des programmes de recherche avec le monde académique pour faire progresser les connaissances dans le domaine du CCUS. (Environ 3 M euros ; 3 projets européens, 15 thèses, 3 projets ANR, 25 Articles, un livre)**

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

RAPPEL DES OBJECTIFS TECHNIQUES DU PROJET

Air separation unit



Unité Cryogénique
(Air Liquide)
 O_2 : 240 t/j

Oxy-combustion Boiler



Chaudière air de 1957 modifiée
par Alstom en oxycombustion
4 brûleurs de 8MWth conçus par Air Liquide
(30 MWth, 40 t/h vapeur @ 60b, 450°C)

Direct Contact Cooler



Refroidissement des gaz
de combustion
de 220°C à 30°C

Compresseur de Rousse



Pentrée: 27bar
Psortie: 50bar

Unité de déshydratation



Sortie : < 20 ppm d'eau

Compresseur Lacq



De 1barg à 27 barg

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

CONCLUSIONS RELATIVES À L'OXYCOMBUSTION, À LA COMPRESSION, AU SÉCHAGE ET AU TRANSPORT DE CO₂

➤ **Unité de production d'oxygène Air Liquide**

(Capacité : 240 t/day O₂ pour des puretés de 95%, 98% et 99.5%vol)

😊 Performances en accord avec la conception



➤ **Chaudière Air modifiée en oxycombustion (4x8 MWth oxy-brûleurs + Ligne de recirculation Fg)**

😊 Démarrage sur air jusqu'à 30% de charge 30% : Conforme

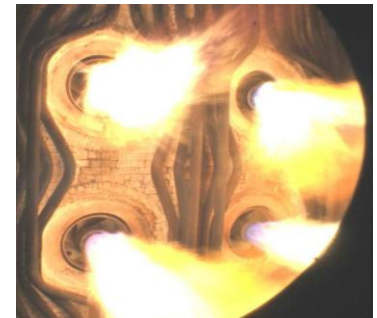
😊 Mode de transition air / oxycombustion : conforme

😊 Marche en continue oxycombustion : conforme

😊 Modification : Transition Air/Oxycombustion automatique implémentée avec succès

😊 Operation des brûleur d'oxycombustion plus souple que brûleurs à air classiques

☹ NO_x produits >400 ppm range (@3%O₂ dry) la source d'azote N₂ provient du gaz commercial (~0.4% vol N₂)



SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

CONCLUSIONS RELATIVES À L'OXYCOMBUSTION, À LA COMPRESSION, AU SÉCHAGE ET AU TRANSPORT DE CO₂

➤ Refroidisseur des gaz de combustion (220 °C → 50°C → 30°C)

😊 Performances en accord avec la conception



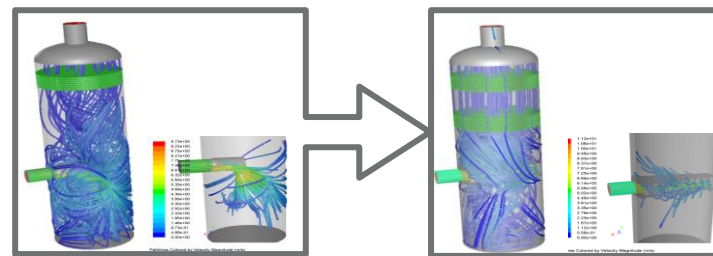
➤ Compresseur alternatif de Lacq (3 Etages reciprocating MWh)

☹ NOx produits >400 ppm range → corrosion par acide nitrique localisée au 3 ième étage

😊 Problème résolu après recherche des causes :



- Refroidir d'avantage les gaz de combustion : 30°C en place de 50°C pour condenser plus d'eau avant leur compression.
- Accroître la température et recycler du CO₂ sec à l'aspiration du compresseur pour éviter la condensation de l'eau 3ième étage
- Amélioration de l'efficacité des internes des séparateurs inter étage Gaz / liquide pour mieux piéger l'eau



SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

CONCLUSIONS RELATIVES À L'OXYCOMBUSTION, À LA COMPRESSION, AU SÉCHAGE ET AU TRANSPORT DE CO₂

- **AL sécheurs tamis moléculaires** (Spec. at 10 ppm d'eau)
 - 😊 Performances en accord avec la conception (10 ppm d'eau en place de 40 ppm)



- **Pipeline de transport de CO₂ en acier**
 - 😊 Performances en accord avec la conception



- **Compresseur CO₂ Rousse (Compresseur alternatif 1 étage)**
 - 😊 Performances en accord avec la conception



- **Tête de puits et complétion d'injection**
 - Matériels et matériaux standard
 - Un travail sur puits a été réalisé en 2011 pour installer de nouveaux capteurs Microsismiques et l'inspection de la complétion n'a révélé aucune corrosion
 - 😊 Performances en accord avec la conception



SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

CONCLUSIONS RELATIVES AU STOCKAGE ET À L'INJECTION

● Injection du CO₂ – injectivité du puits

Objectif: s'assurer que le puits ne se bouche pas en cours d'injection et qu'il n'est pas nécessaire d'injecter à forte pression

- Pas d'anomalie (pas de surpression) observée en phase d'injection
- Injectivité en ligne avec le comportement du puits en phase de production
 - Calcul à différentes dates des paramètres de fonctionnement de l'injecteur (dont le skin) concluant à la stabilité de l'injectivité du puits

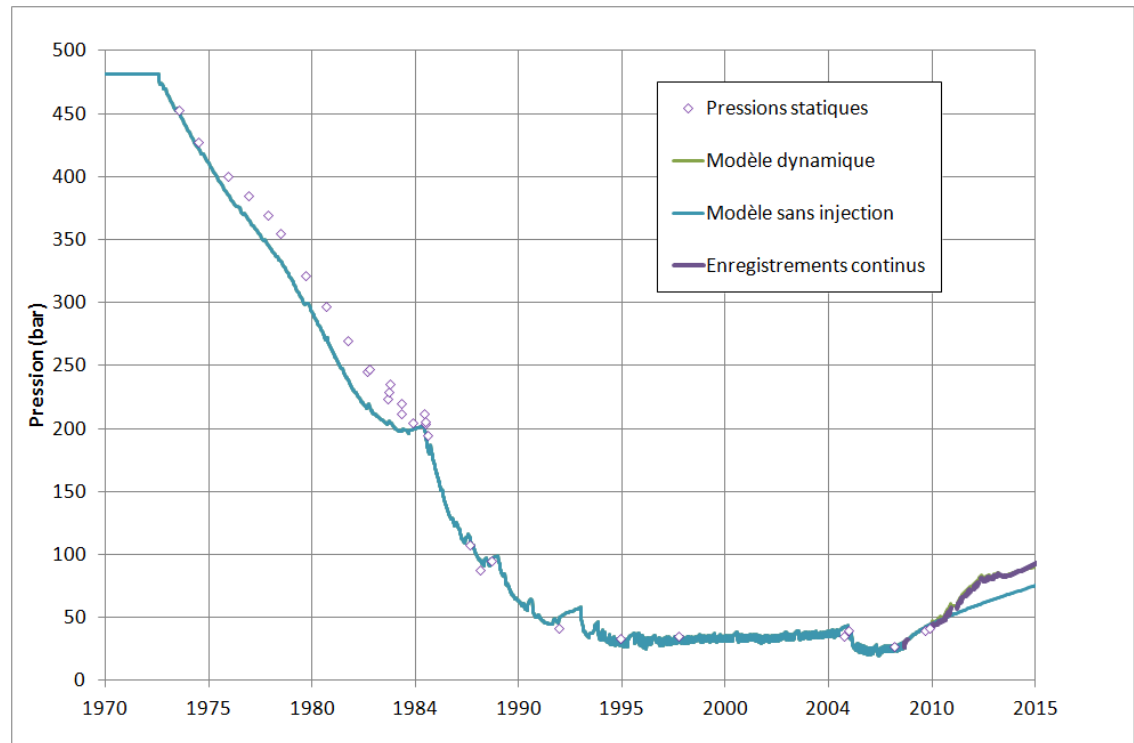
Remarque: les modèles thermodynamiques proche puits indiquent que les abords du puits étaient totalement déshydratés dès la période de production, on n'attendait donc pas d'effet chimique (dépôt de sel) lors de la période d'injection

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

CONCLUSIONS RELATIVES AU STOCKAGE ET À L'INJECTION

● Comportement de la pression en cours d'injection

- Objectif: vérifier la cohérence des modèles du sous-sol avec les enregistrements de pression (durant la phase de production puis d'injection)
- Résultat: Le modèle établi est cohérent avec les enregistrements de pression et les données géologiques et géophysiques régionales. Il permet de distinguer l'effet de rééquilibrage naturel du réservoir de celui de l'injection de CO₂



SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

CONCLUSIONS RELATIVES AU STOCKAGE ET À L'INJECTION

- **Modélisation à long terme du devenir du CO₂ dans le réservoir de Rousse**
 - De part sa plus grande masse volumique que le gaz en place (hydrocarbures), le CO₂ va migrer vers les points bas du réservoir en limitant les interactions chimiques avec la couverture
 - Les impacts chimiques du CO₂ dans le réservoir ont été établis avec des contributions de l'IFPEN, du BRGM et du CREGU.
 - Le pH de l'eau de formation diminue de 5.1 à 4.3 (acide faible)
 - ce qui entraîne une dissolution marginale de calcite et une dissolution de la chlorite (minéral à l'état de trace)
 - Cette dissolution est compensée par une précipitation marginale de dolomite
 - Effet négligeables sur la texture de la matrice rocheuse du réservoir, sans impact sur ses propriétés (mécaniques ou pétrophysiques)

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

CONCLUSIONS RELATIVES AU STOCKAGE ET À L'INJECTION

● Evaluation de l'intégrité du réservoir et de sa couverture

- Intégrité mécanique
 - Le réservoir a prouvé une intégrité à 480 bars
 - Les volumes soutirés étant beaucoup plus important que les volumes injectés, la pression restera nettement inférieure
 - En raison des propriétés de la roche, les déplacements étaient faibles (centimétriques) et élastiques
- Entrée capillaire dans la couverture du réservoir
 - Exclu en raison des fortes pression d'eau dans les roches couvertures
- Stabilité chimique des minéraux de la couverture
 - Contact CO₂ – couverture faible en raison de la masse volumique du CO₂
 - Les études chimiques montrent une altération de quelques mètres de la couverture en 10 000 ans en supposant un contact continu du CO₂ avec la couverture

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

FERMETURE DÉFINITIVE DU PUIITS RSE-1

- Le puits RSE-1 utilisé comme injecteur de CO₂ dans le cadre du pilote CCS de Lacq a été bouché définitivement entre le 04 Avril et 26 Mai 2015:
 - Conformément au canevas pour l'élaboration d'un programme de fermeture définitive de puits (article 49 du titre forage du RGIE) révision du 04/12/2009, auteur Bernard Le-Gorec
 - Conformément à la company rule TOTAL CR EP FP 424 'Well integrity, Plug and Abandon' rev4 du 04/2011
- La pression en tête de puits a été enregistrée pendant 6 mois confirmant l'étanchéité du puits.

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

FERMETURE DÉFINITIVE DU PUIT RSE-1

● Contrôle de la qualité des cimentations:

- Cimentation du casing 7" contrôlée de 4 380m jusqu'en surface
 - Confirmation de la très bonne qualité du ciment jusqu'à 3 560m (Top Of Cement), en ligne avec le dernier contrôle de 2009
- Cimentation du casing 9 5/8" de 3 463m jusqu'en surface
 - Ciment de très bonne qualité de 3 463m jusqu'à 2 500m, un peu plus hétérogène jusqu'à 2 246m mais de qualité suffisante pour bloquer tout déplacement de fluides derrière le tubage
 - Cette diagraphie confirme l'interprétation du log de thermométrie réalisée lors du forage du puits, i.e. 2 270m
- Cimentation du casing 13 3/8" de 1 096m jusqu'en surface
 - Ciment de très bonne qualité de 1096m jusqu'à 125m, plus hétérogène jusqu'à 55m garantissant toutefois l'absence de risque de déplacement de fluides derrière le tubage.

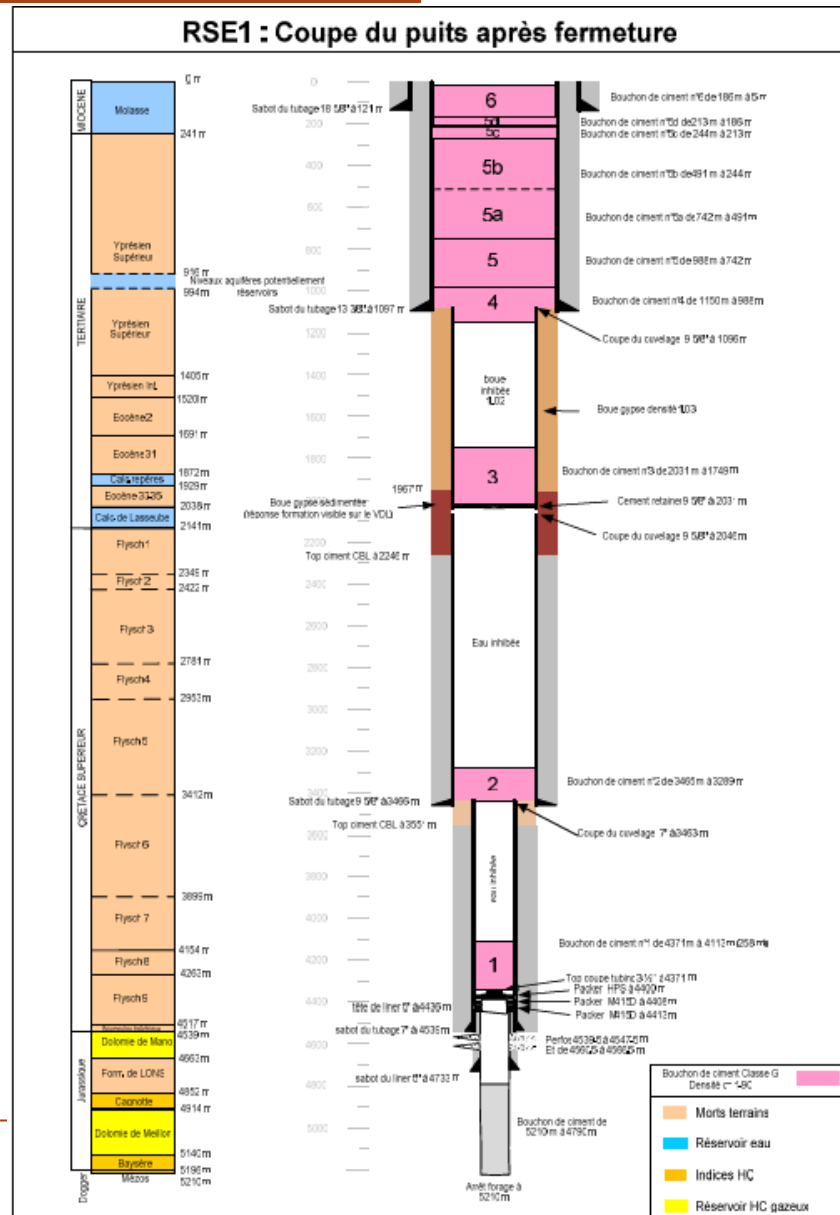
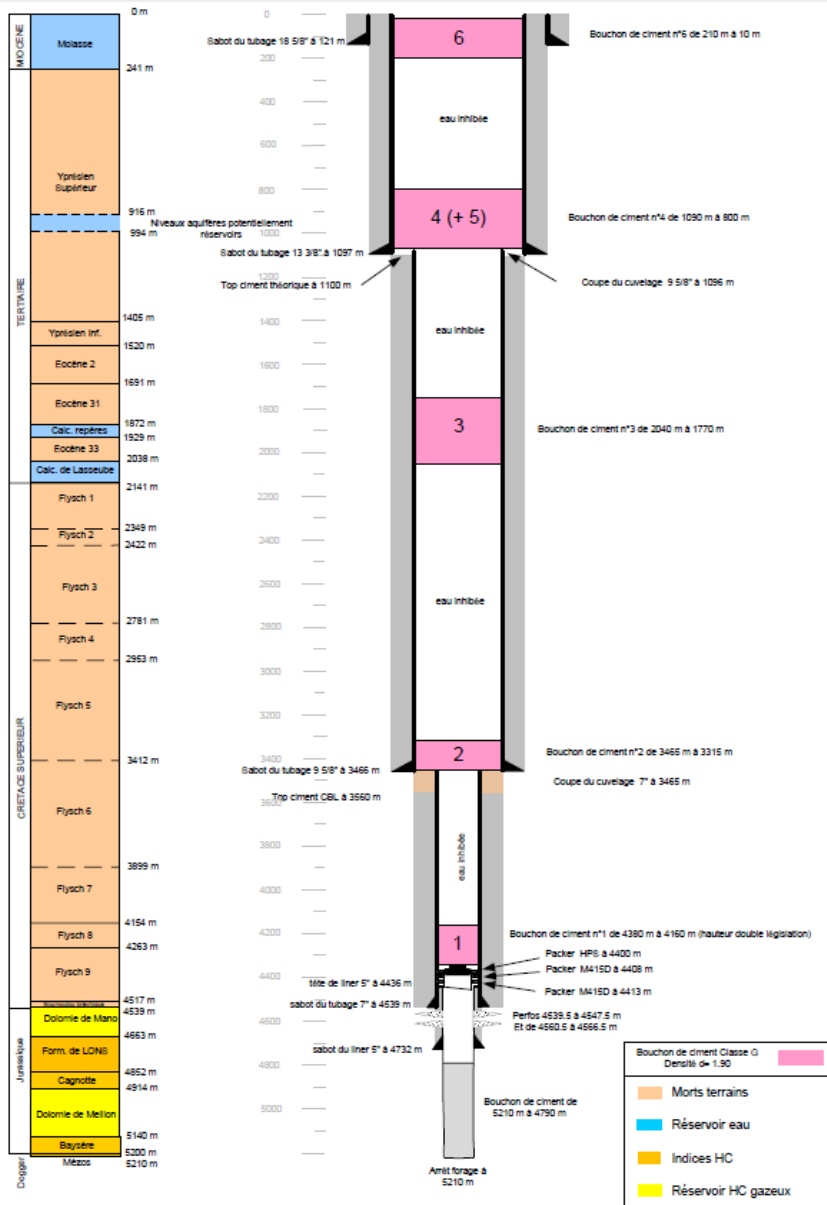
SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

FERMETURE DÉFINITIVE DU PUIITS RSE-1

- 10 bouchons de ciment mis en places dans le puits, testés en poids (+2T) et en pression (35 – 210b)
- Découpes des cuvelages 7" et 9 5/8" au sabot des cuvelages précédents
- Test d'injectivité au dessus du top ciment du cuvelage 9 5/8"
- **Objectifs:**
 - Assurer une barrière mécanique horizontale pour isoler les réservoir/aquifères entre eux
 - Prévenir tout risque de cheminement des aquifères de l'Yprésien vers ceux de la surface du fait de la mauvaise qualité des filetages du cuvelage 13 3/8" (5 bouchons additionnels)
 - Confirmer l'absence d'injectivité dans l'annulaire au droit des aquifères du Lasseube et repères.

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

FERMETURE DÉFINITIVE DU PUIIS RSE-1



SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

PROGRAMME DE SURVEILLANCE (HORS MICROSISMICITE)

- Détection de surface CO₂ et H₂S et Pressions annulaires (EA0 et EA1)
 - Aucune détection ou mesure anormale
- Mesures des gaz des sols
 - Aucun flux de méthane
 - Flux et concentrations de CO₂ cohérentes avec les valeurs de référence
 - Teneurs isotopiques représentatives des gaz biogéniques
- Eaux de surface
 - Aucune anomalie sur les teneurs en polluants (non nécessairement liées au projet)
 - Des évolutions des caractéristiques de la chimie du carbone, mais cohérentes avec les valeurs du site de référence
 - Aucune variation de la qualité hydrobiologique liée à une éventuelle acidification
- Eaux souterraines
 - Une minéralisation croissante des captages C3 et C4 non liée au Projet a été observée
 - Les teneurs isotopiques du Carbone 13 sont représentatives des gaz biogéniques
- Faune et flore
 - Des mesures de grande variabilité qui ont amené à arrêter le suivi en 2014.

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

PROGRAMME DE SURVEILLANCE (HORS MICROSISMICITE)

ENSEIGNEMENTS:

- Des surveillances directes pertinentes:

- Détecteurs de CO₂ de surface proches du puits
- Pression annulaires
- Mesures des gaz des sols avec analyse isotopique
- Eaux souterraines avec analyse isotopique

- Des mesures indirectes de faible intérêt

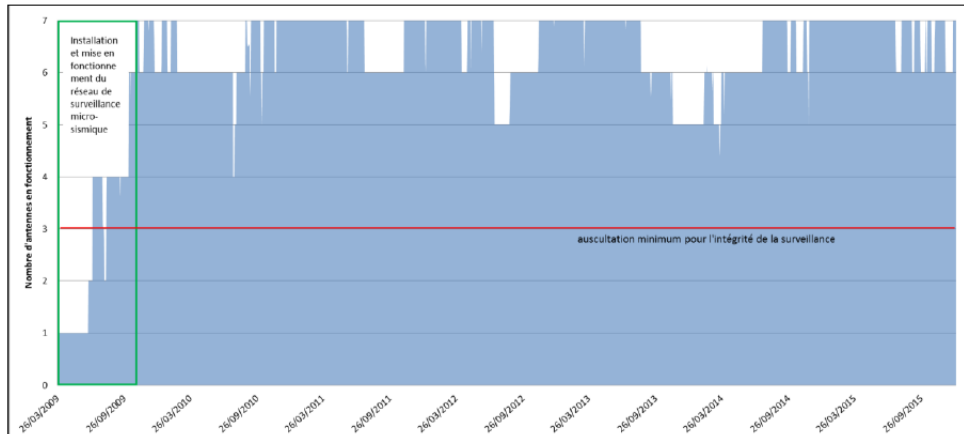
- Eaux de surface
- Faune et flore

Il faudra améliorer ou éviter ce type de suivi afin de ne mettre en œuvre que des suivis "discriminants" tels que fournis par les suivis isotopiques du Carbone 13 dans les eaux souterraines et les gaz des sols.

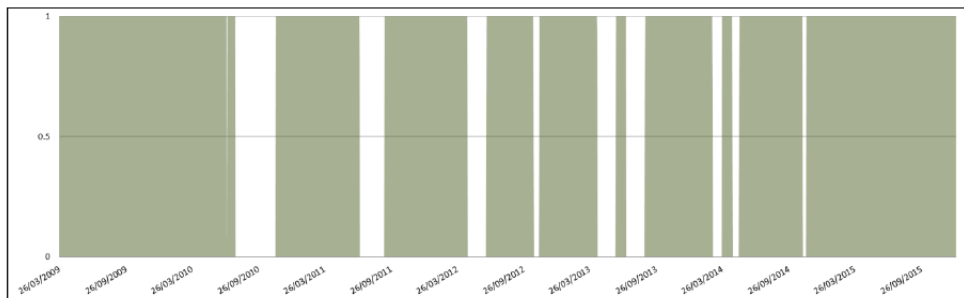
SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

PROGRAMME DE SURVEILLANCE MICROSISMIQUE

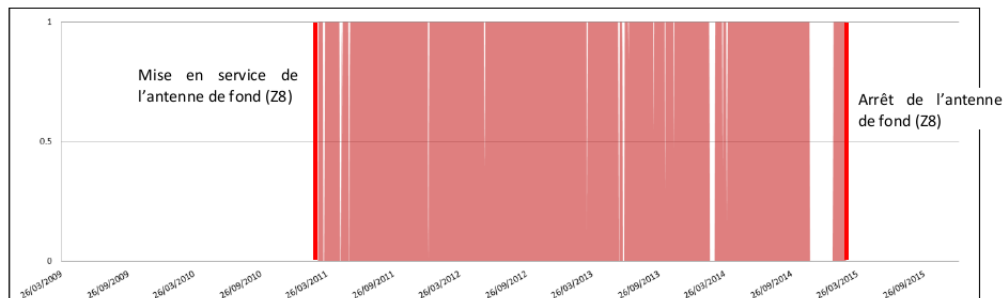
TAUX DE FONCTIONNEMENT



Réseau maître : 100%



Sismomètre



Antenne de fond

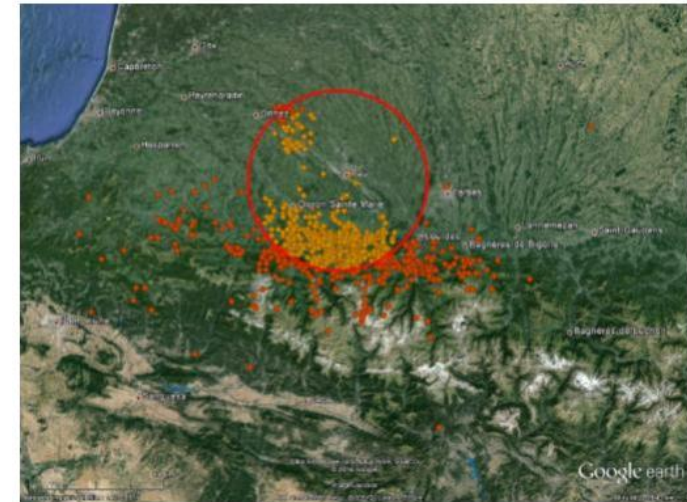
SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

PROGRAMME DE SURVEILLANCE MICROSISMIQUE *BILAN SISMICITÉ*

Intégrité



Sismicité naturelle

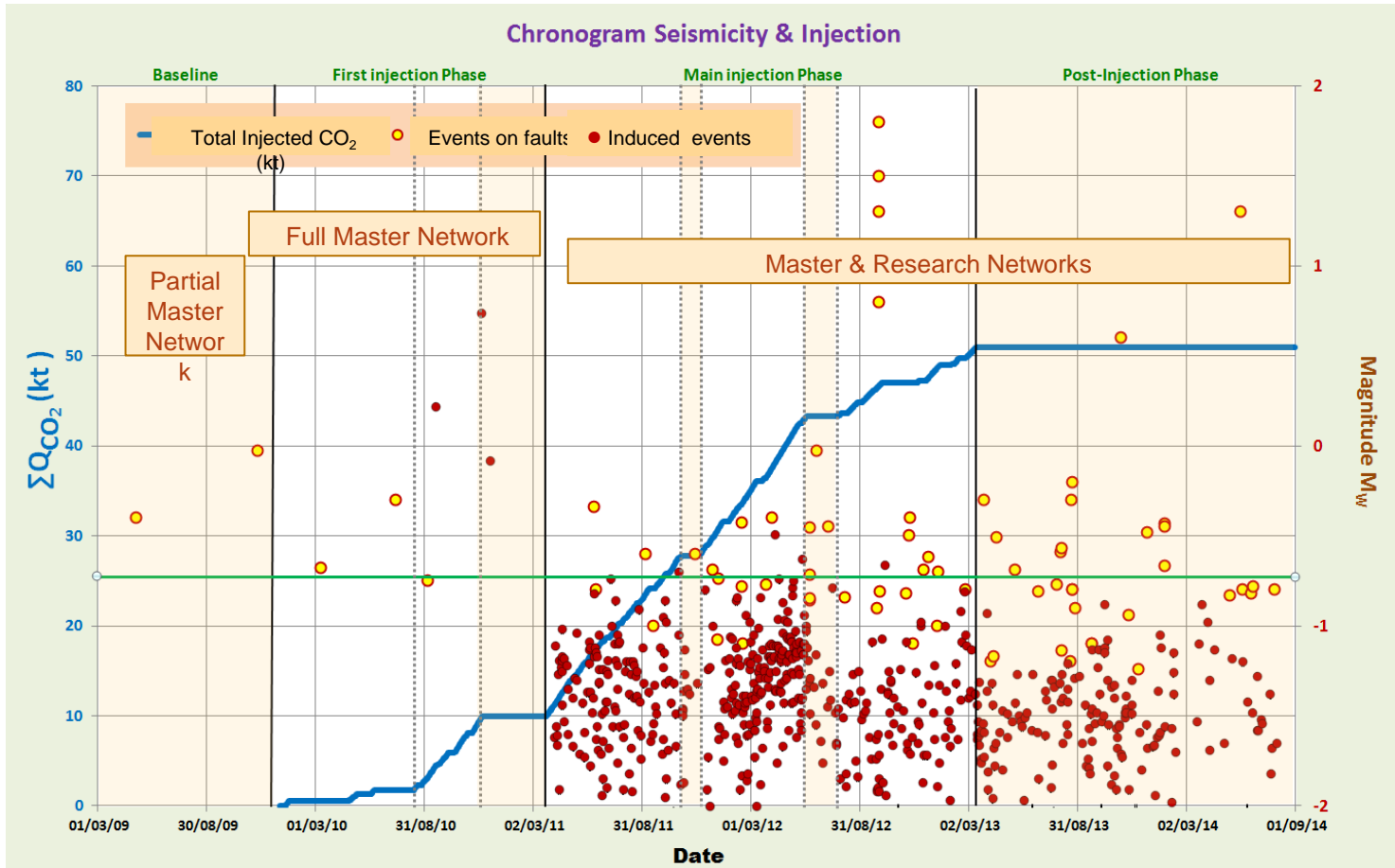


Microsismicité réservoir



SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

PROGRAMME DE SURVEILLANCE MICROSISMIQUE RELATION INJECTION-SISMICITÉ



Sismicité observée en fonction des phases d'injection,
et du niveau de déploiement du réseau de monitoring sismique



Source : XP, GHGT-12, 2014

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

CONCLUSIONS SUR LA SURVEILLANCE SISMIQUE

- **Bilan technique - Performances conformes aux attentes**

Sensibilité de localisation effective conforme aux prévisions :

- Réseau de subsurface : tous événements de magnitude > -0.6 dans un rayon de 2,5 km autour du puits (confirmé par la sonde de fond)
- Réseau de fond : tous événements de magnitude > -2 dans un rayon de 500 m zone autour de l'antenne.

Avec une sensibilité de localisation effective de l'ordre de -0,6, un réseau de surface/subsurface avec un nombre limité de stations est tout à fait adapté à la surveillance opérationnelle d'injection dans un environnement complexe.

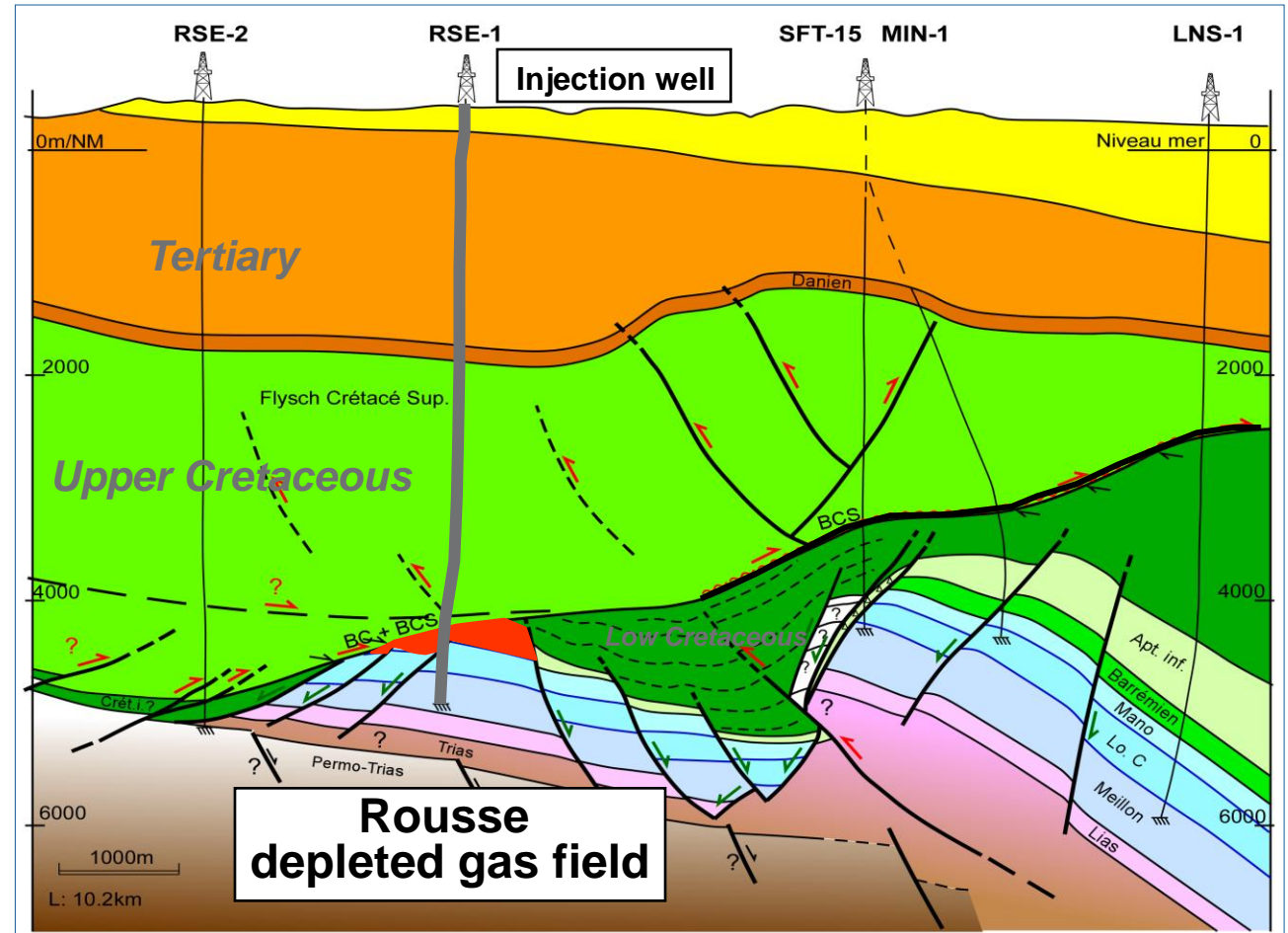
- **Bilan de la surveillance - Aucun événement critique enregistré pendant et après l'injection: après plus de six ans, seuls des événements nanosismiques ont été localisés dans le réservoir au voisinage du point d'injection, plusieurs centaines par la sonde de fond, une douzaine par le dispositif de subsurface.**

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

PILOTE DE ROUSSE: UN RÉSERVOIR DOTÉ D'UNE COUVERTURE DE 2000 M D'ÉPAISSEUR

- Profondeur du réservoir 4500m
- Epaisseur de la couverture : 2000 m
- Pression initiale 480 bar
- Produit de 1972 à 2008
- Un seul puits RSE-1

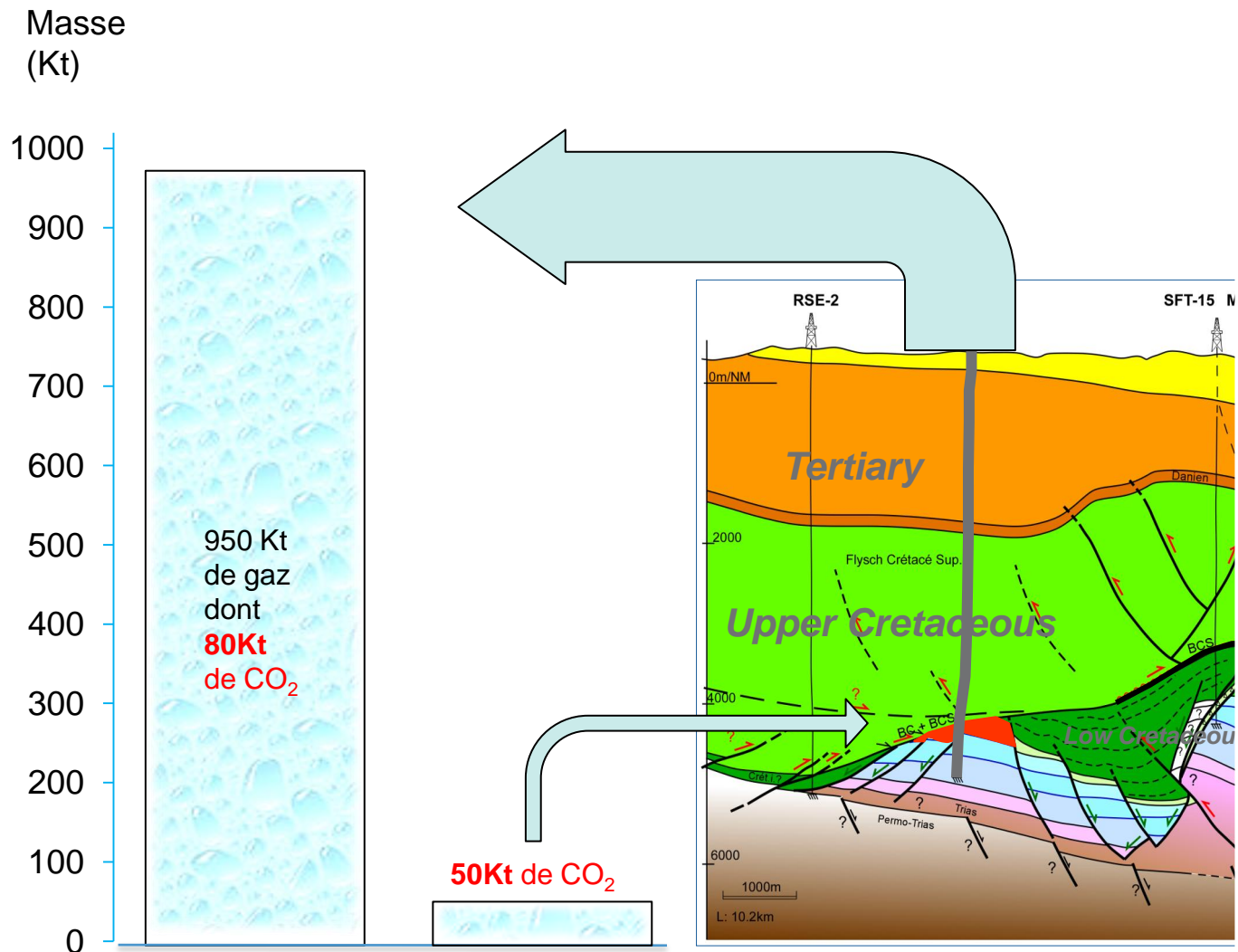


PILOTE DE ROUSSE:

L'INJECTION D'UN INVENTAIRE LIMITÉ DANS UN RÉSERVOIR FORTEMENT DÉPLÉTÉ

- Une injection de faible ampleur par rapport à l'inventaire initialement en place

- Une quantité de CO₂ injectée (50 kt) inférieure à celle qui fut extraite (80 kt)



PILOTE DE ROUSSE:

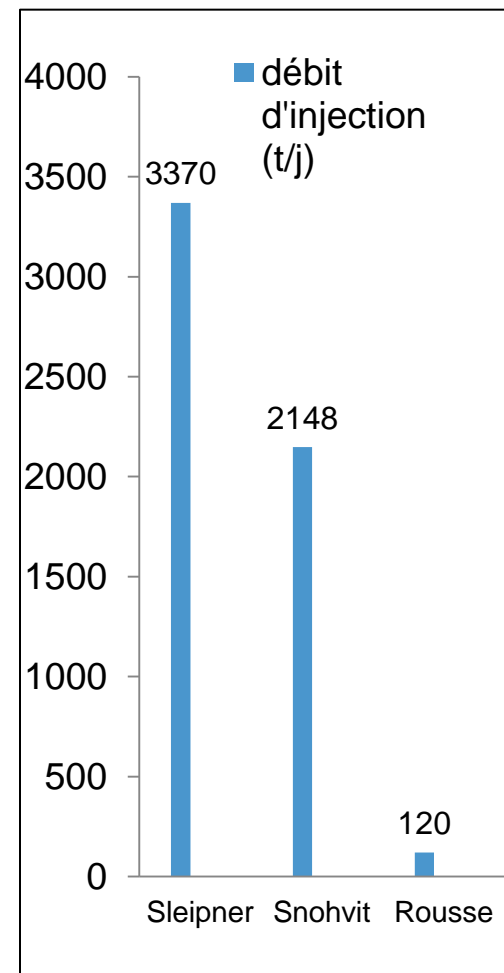
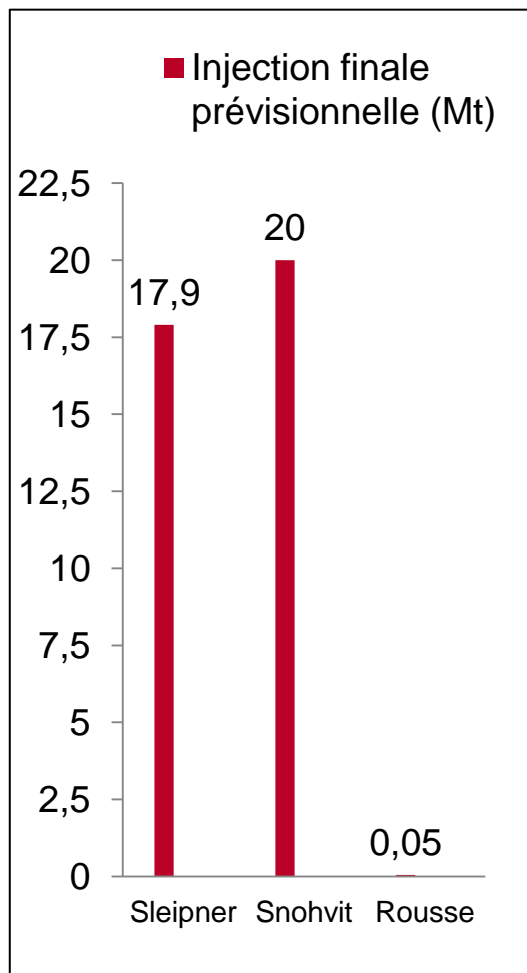
UNE DEMONSTRATION TECHNOLOGIQUE À ECHELLE "REDUITE"

L'injection de Rouse:

- Un vrai pilote (pas un site industriel)

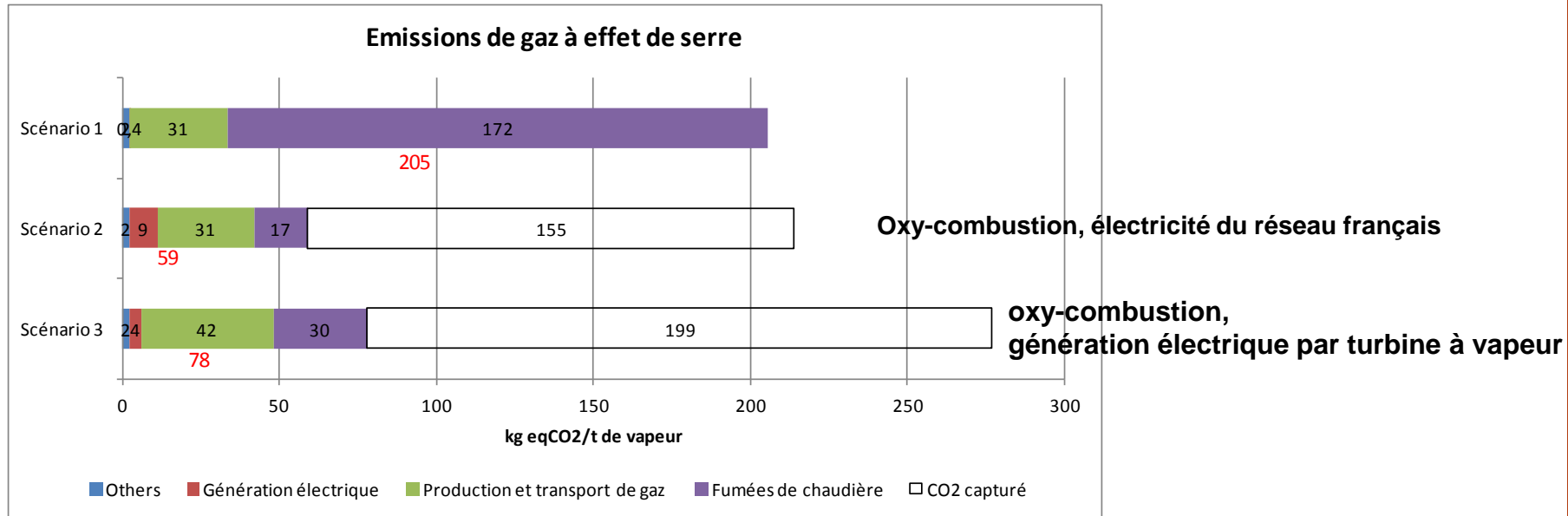
- Un volume injecté de 300 à 500 fois plus petit que sur Snohvit et Sleipner

- Un débit d'injection plus de 20 fois inférieur à ceux de Snohvit et Sleipner



SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

CONCLUSIONS GÉNÉRALES: BILAN CARBONE



=> **Réduction de 72% et 62%** dans le contexte français de génération électrique.

Réduction de 83% si le gaz est produit localement comme à Lacq

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

CONCLUSIONS GÉNÉRALES: ETUDE DE DANGER

ENSEIGNEMENTS:

- Le processus d'étude de dangers développé sur la base des méthodologies déployées pour des installations de surface peut être appliqué à un projet CCS.
- De nouveaux outils ont dû être développés pour certains scénarios subsurface, par exemple:
 - les conséquences possibles sur la structure du puits d'un événement sismique majeur localisé au droit de celui-ci
 - les conséquences d'une mise en communication entre le réservoir de stockage et l'aquifère du Lasseube dans le cas d'un scénario de micro-annulaire le long du puits.

Ils pourront être déployés pour d'autres projets où ces scénarios de risques seront plausibles.

SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS DE L'EXPÉRIMENTATION

CONCLUSIONS GÉNÉRALES: PROJET CCS GLOBAL

ENSEIGNEMENTS:

- La faisabilité technique d'une chaîne industrielle Captage-Transport-Stockage intégrée a été validée.
- Les brûleurs gaz/oxygène (8 MW) « nouvelle génération » développés par la société Air Liquide ont été qualifiés et peuvent être intégrés dans les conceptions futures.
- Le projet a permis de valider la méthodologie de sélection et de qualification d'un site de stockage de CO₂ :
 - Les études géologiques, réservoir et géomécaniques concluant à l'absence d'endommagement de la couverture suite à l'injection de CO₂
 - les études géochimiques montrant l'absence de réactions chimiques dommageables du CO₂ sur les roches du réservoir et sa couverture
 - Les études sur l'interaction entre les gaz acides et les ciments pétroliers démontrant que les propriétés mécaniques du ciment d'un puit s'améliorent au contact du CO₂.
- Le dialogue avec les parties prenantes est impératif pour mener à bien de tels projets et celui-ci doit se construire sur le partage des informations concernant le projet, les opérations et les données du programme de surveillance.